

## Розробка спеціалізованого моделюючого комплексу для дослідження систем керування морських рухомих об'єктів

Я. Б. Волянська, С. М. Волянський

*Розроблено, створено, випробувано і впроваджено у навчальному процесі спеціалізований моделюючий комплекс для дослідження ефективності систем керування електроприводами постійного та змінного струму, до складу якого входить метрологічно атестований навчально-дослідницький лабораторний засіб «Стенд випробувальний СВ-1». Показано можливість синтезу систем керування рушійним пристроєм підводного апарата з різними типами регуляторів і їх подальшою корекцією*

*Ключові слова: регулятор, рушійний пристрій, підводний апарат, спеціалізований моделюючий комплекс, точність керування*

### 1. Вступ

Сучасні морські рухомі об'єкти (МРО) – чисельний клас динамічних систем, що функціонують в умовах значного впливу зовнішнього середовища [1, 2]. До МРО відносяться найбільш поширені водотонажні судна, судна з динамічним принципом підтримки (на повітряній подушці, на підводних крилах), підводні апарати-роботи, пошуково-розвідувальні комплекси та ін.

Морські рухомі об'єкти здатні ефективно вирішувати низку важливих задач різного призначення, обсяг яких постійно розширюється. У зв'язку з цим спостерігається постійне підвищення вимог щодо маневреності, функціональних можливостей МРО, продуктивності виконуваних робіт, що передбачає удосконалення систем керування рухом об'єктів морської робототехніки. Такі системи повинні забезпечувати точну стабілізацію, динамічне позиціонування і його орієнтацію в географічній точці водного простору.

Розробка систем керування (СК) рухомими об'єктами різного призначення та методів їх моделювання завжди знаходилися в центрі уваги провідних учених [3–5].

Але, незважаючи на суттєві досягнення в напрямку розробки та дослідження систем керування рухом судів і підводних апаратів, однією з актуальних задач, пов'язаних з проектуванням та експлуатацією об'єктів морської робототехніки, залишається задача створення високоякісних систем керування, які повинні забезпечувати бажану динаміку і точність відпрацювання програмних траєкторій руху.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Розширення масштабів науково-дослідних, військових, аварійно-рятувальних робіт, вирішення актуальних питань з екологічної безпеки та охо-

рони довкілля на воді, проведення антитерористичних заходів призвело до зростання потреби у такому класі МРО, як підводні апарати (ПА) [6, 7].

Відомо, що одним з виконавчих механізмів ПА, що відповідає за керування його рухом і точністю просторового положення, є рушійно-кермовий комплекс (РКК), до складу якого входять рушійні пристрої (РП) [8]. Але, саме РКК ПА, як об'єкт керування, на сьогоднішній час залишається мало дослідженим.

Труднощі виникають під час розробки систем керування рушійним пристроєм підводного апарата, які в значній мірі пов'язані з невизначеністю інформації щодо стану параметрів окремих вузлів і агрегатів, відхиленням ПА від заданої траєкторії руху, а також обумовлені наявністю постійно діючих збурень, викликаних зовнішнім середовищем [9].

Існуючі методи синтезу нелінійних, самоналагоджувальних і адаптивних систем [10] через високу розмірність і багатозв'язність об'єкта керування потребують дорогих керуючих систем, які вимагають безперервної ідентифікації параметрів об'єкта керування і складного підстроювання регуляторів [11].

Відомий підхід, при якому, як правило, керування РП ПА здійснюється на основі визначення неузгодженості між оцінками і заданими значеннями параметрів руху в пов'язаній з підводним апаратом системою координат з подальшим використанням пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора [12]. Такий підхід дозволив створити системи керування рухом для складних криволінійних траєкторій шляхом поділу криволінійної траєкторії руху на прямолінійні ділянки, перехід на кожен з яких вимагає перевизначення коефіцієнтів ПІД-регулятора [13].

Важливою обставиною при проектуванні систем керування РП ПА є те, що ПА проходять під водою значні відстані з малими відхиленнями від заданої траєкторії руху, тобто прямолінійний рух являється основним видом руху підводного апарата. Тому саме до нього висуваються вимоги відносно підвищення точності за рахунок автоматизації.

Рішення даної задачі в значній мірі пов'язано зі змінами гідродинамічних параметрів модулів ПА, що вимагає розробку нових і вдосконалення існуючих схем РКК, до складу яких входять рушійні пристрої з баророзвантаженими асинхронними двигунами (БАД), заповненими рідким діелектриком [14]. Проста конструкція БАД і невисока вартість сприяють розширенню їх типорозмірного ряду і серійності виготовлення.

У сучасній практиці проектування комп'ютерний експеримент є ефективним інноваційним шляхом синтезу СК складними рухомими об'єктами [15]. Це стосується, у першу чергу, вирішення задач, які трудно формалізуються, а також випадків, коли вимірювальні дані недостатньо повні та отримуються в умовах наявності невизначеностей структурного, статистичного і параметричного характеру. Тому виникає необхідність у розробці моделюючих комплексів [16], які дозволяють обходитися без використання дорогого обладнання та спеціальних басейнів, а також забезпечують безпеку проведених експериментів.

Відомі такі комплекси, як Webots [17], що дозволяє проводити візуалізацію результатів моделювання в тривимірному просторі і реалізує принцип швидкого прототипування; середа RobotSim [18], що забезпечує моделювання руху мобільних

роботів з урахуванням ефектів їх взаємодії з навколишнім середовищем; програмний комплекс Microsoft Robotic Studio [19], що дозволяє розробляти алгоритми керування рухом мобільних роботів різного призначення та ін.

Однак, незважаючи на суттєві можливості описаних вище моделюючих комплексів, існують задачі, наприклад, проведення перевірки правильності реалізації алгоритмів керування в реальній СК при її роботі в різних режимах, для виконання яких їх використання або неможливо, або вимагає значних модифікацій. Це обумовлює необхідність створення спеціалізованих моделюючих комплексів для напівнатурного моделювання роботи систем керування РП з БАД, які за рахунок автоматичної настройки параметрів регуляторів і програмних сигналів забезпечують високоточний горизонтальний прямолінійний рух підводного апарата.

### **3. Ціль і задачі дослідження**

Ціль досліджень: розробка, створення й апробація спеціалізованого моделюючого комплексу для оцінки ефективності роботи систем керування рушійним пристроєм підводного апарата.

Для досягнення поставленої цілі необхідно розв'язати наступні задачі:

- розробка програмної та електромеханічної частин спеціалізованого моделюючого комплексу (СМК), призначеного для дослідження ефективності роботи СК електроприводами постійного та змінного струму;
- проведення метрологічної атестації навчально-дослідницького лабораторного засобу «Стенд випробувальний СВ-1», що входить до складу СМК;
- реалізація та дослідження на СМК СК РП з БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з синтезованими регуляторами.

## **4. Матеріали та методи досліджень ефективності роботи систем керування рушійним пристроєм підводного апарата на спеціалізованому моделюючому комплексі**

### **4. 1. Розробка спеціалізованого моделюючого комплексу**

Сьогодні значна частина досліджень СК електроприводом проводиться шляхом математичного моделювання з використанням прикладних пакетів MATLAB, Mathcad [20]. Відомо, що в цьому випадку допущення, прийняті при описі блоків САК, призводять до зниження її точності, стійкості і т. д. [21, 22]. Для зведення до мінімуму впливу допущень на якість керування системою, необхідно проводити експерименти на конкретному електроприводі, що не завжди можливо, або на його натурній імітаційній моделі.

Для цього був розроблений спеціалізований моделюючий комплекс у складі спеціалізованого програмного забезпечення і навчально-дослідницького лабораторного засобу «Стенд випробувальний СВ-1». Останній призначений для дослідження ефективності СК електроприводами постійного або змінного струму рушійно-кормових комплексів підводних апаратів.

Стенд випробувальний СВ-1 складається з наступних блоків:

- електромеханічний блок, що включає електричні машини для випробувань і навантаження;

– силовий блок 1, призначений для живлення машини для випробувань. Може використовуватися джерело з регульованою частотою й напругою живлення для асинхронних або синхронних двигунів або джерело регульованої постійної напруги для машин постійного струму;

– силовий блок 2 – містить джерело регульованої постійної напруги для живлення машини навантаження;

– вимірювальний блок з датчиками швидкості, кута положення, струму, напруги, температури;

– блок сполучення, призначений для зв'язку вимірювального блока, силових блоків 1 і 2 з ПЕОМ;

– блок керування, який включає ПЕОМ.

Схему стенда випробувального СВ-1 представлено на рис. 1.

Розподіл на канали машини для випробувань та машини навантаження обумовлений уніфікацією модулів і зниженням впливу однієї машини на іншу.

Спеціальний периферійний модуль (СПМ) у свою чергу складається з блока сполучення з ПЕОМ, блока керування, силового блока (СБ), блока виміру.

СПМ дозволяє вводити в персональний комп'ютер сигнали зворотних зв'язків і виводити керуючий сигнал. Основним елементом СПМ є мікроконтролер Microchip PIC18F2431(DD1) (США). Вибір мікроконтролера обумовлений наявністю високопродуктивного АЦП і ШІІ апаратного модулятора з розвиненими функціями.

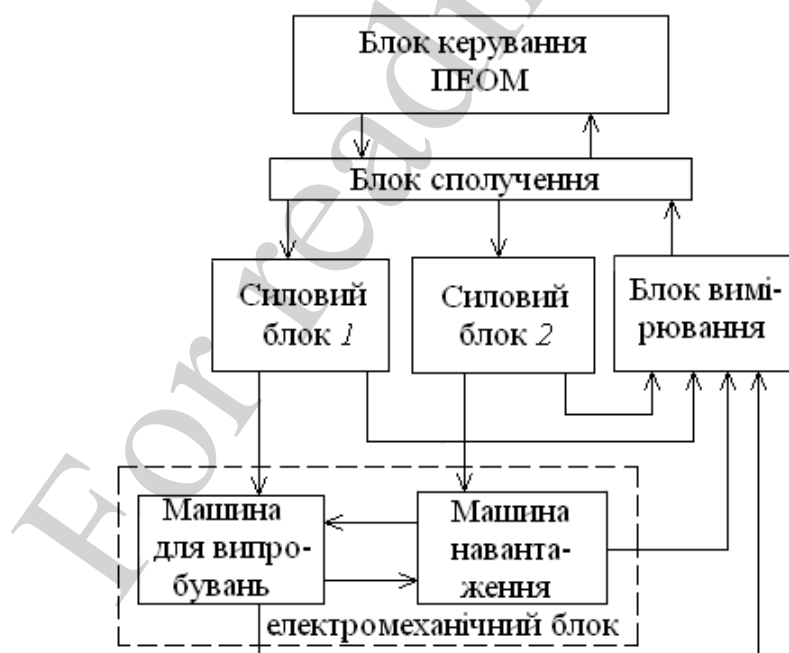


Рис. 1. Схема стенда випробувального СВ-1

РС-фільтри встановлені перед аналоговими входами, призначені тільки для пригнічення високочастотних перешкод, основна фільтрація реалізується програмним забезпеченням мікроконтролера. З виходів апаратного ШІІ-модулятора сигнали подаються на драйвер IR2133(DD2), який керує силовими транзисторами і

здійснює захист від короткого замикання та зниження напруги живлення ланцюгів керування. Вихідний силовий каскад є імпульсним регулятором знижуючого типу (чоперна схема), в якому зворотний діод для підвищення ККД замінений на польовий транзистор. Як силові транзистори вибрані IRFP4710, що відрізняються дуже низьким опором каналу у відкритому стані, – 0,014 Ом.

На виході силового каскаду встановлено фільтр L1C29R29, призначення якого – обмеження швидкості наростання вихідної напруги для захисту ізоляції навантаження й пригнічення паразитних коливань у довгій лінії. Зв'язок з персональним комп'ютером здійснюється по паралельному інтерфейсу. Для забезпечення надійності та електробезпеки драйвер (DD3) гальванічно розв'язаний від основної схеми за допомогою швидкодіючих оптронів DA1 і DA2 6N136, живлення драйвера забезпечується за допомогою DC/DC–перетворювача DCP010505. Живлення СБ забезпечується двома стабілізованими джерелами – 15 і 5 В. Оскільки джерело живлення 5 В використовується як опорне для АЦП, воно виконане як прецизійне на основі стабілізатора LM317 і джерела опорної напруги TL431.

Програмне забезпечення мікроконтролера відносно просте. Воно включає в себе ініціалізацію периферійних модулів мікроконтролера: USART, АЦП, ШІ–модулятор і деяких інших [23]. Періодично викликається зв'язна процедура, яка пересилає в персональний комп'ютер виміряні й відфільтровані сигнали зворотних зв'язків, приймає керуючий байт і поміщає його в регістр керування шпаруватістю модулятора. Дані передаються у бінарному форматі, стартовий байт – 00.

Перед відправкою даних персональному комп'ютеру слід перетворити виміряні миттєві значення сигналів зворотного зв'язку в середні або такі, що діють за період або декілька періодів. Підпрограма цифрового фільтра виконана у двох варіантах.

Перший варіант – БІХ-фільтр другого порядку. Був вибраний фільтр з критичним загасанням. Вибір обумовлений декількома причинами: фільтр може бути реалізований за допомогою цілочислової арифметики, такий фільтр має високу якість перехідної характеристики. Для простоти обчислень було вирішено реалізовувати такий фільтр як дві ланки першого порядку, сполучені послідовно. Кожна ланка реалізована виразом:

$$y_i = \frac{(K - 1)y_{i-1} + x_i}{K},$$

де  $K$  – сталий коефіцієнт.

Якщо прийняти  $K=2^n$ , наприклад 256, і перетворити початковий вираз до виду:

$$y_i = \frac{Ky_{i-1} - y_{i-1} + x_i}{K},$$

то при програмній реалізації можна обійтися тільки цілочисловим складанням, відніманням і зрушенням. У середовищі MathCad був змодельований такий ал-

горитм. Перехідну характеристику фільтра при частоті дискретизації 10 кГц показано на рис. 2.

$$i := 0..2000; u_{1i} := 256 \left| \sin\left(\frac{6 \cdot i}{200}\right) \right|;$$

$$u_{2i+1} := \frac{255u_{2i} + u_{1i}}{256}; u_{3i+1} := \frac{255u_{3i} + u_{2i}}{256}.$$

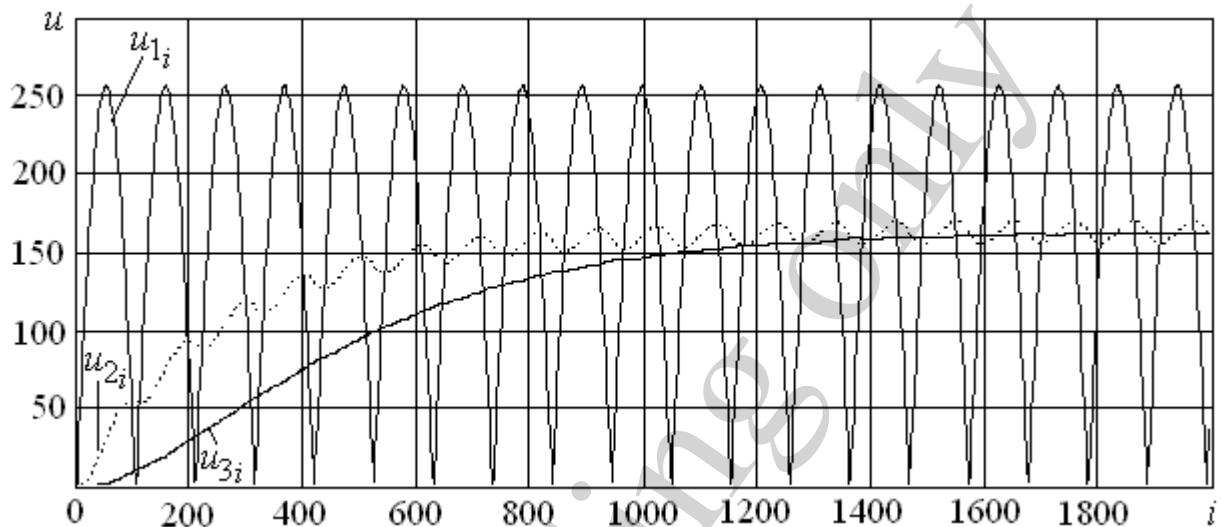


Рис. 2. Перехідна характеристика фільтра при частоті дискретизації 10 кГц: крива  $u_{1i}$  – досліджуваний сигнал; крива  $u_{2i}$  – сигнал після фільтра першого порядку; крива  $u_{3i}$  – результуючий сигнал після фільтра другого порядку

Для підвищення швидкодії системи був розроблений другий варіант фільтра – КІХ-фільтр «ковзне середнє». Щоб такий фільтр міг ефективно обчислювати середнє значення за період при нестабільній частоті сигналу, потрібна певна модернізація традиційного алгоритму. Такий модернізований алгоритм отримав назву синхронний фільтр «ковзне середнє». Схему алгоритму показано на рис. 3.

В основній програмі проводиться ділення накопиченої суми на кількість зроблених вимірів (лічильник). Оскільки мікроконтролер не має апаратно реалізованої операції ділення, для ділення використовується спеціальна підпрограма, особливістю якої є заміна ділення множенням на число, перетворене в додатковий код.

Загальний вигляд електромеханічної частини стенда випробувального СВ-1 представлено на рис. 4.

Для забезпечення регульованого навантаження використовується асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (машина навантаження), включений у режим динамічного гальмування. Особливість машини навантаження полягає в тому, що ротор і статор можуть обертатися незалежно один від одного. Це забезпечується нерухомою перехідною опорою 3, на яку насаджено статор 2 через втулку на підшипниках кочення. Ротор має подовжений вал, що оберта-

ється на встановлених у нерухомій опорі підшипниках кочення. Штатні підшипники видалено з двигуна, що дозволило механічно розв'язати ротор і статор.

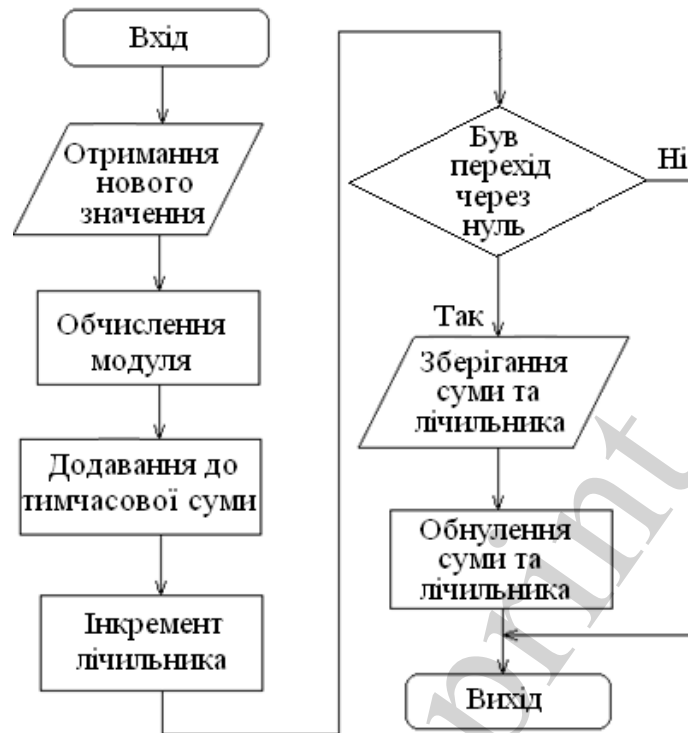


Рис. 3. Схема алгоритму синхронного фільтру «ковзне середнє»

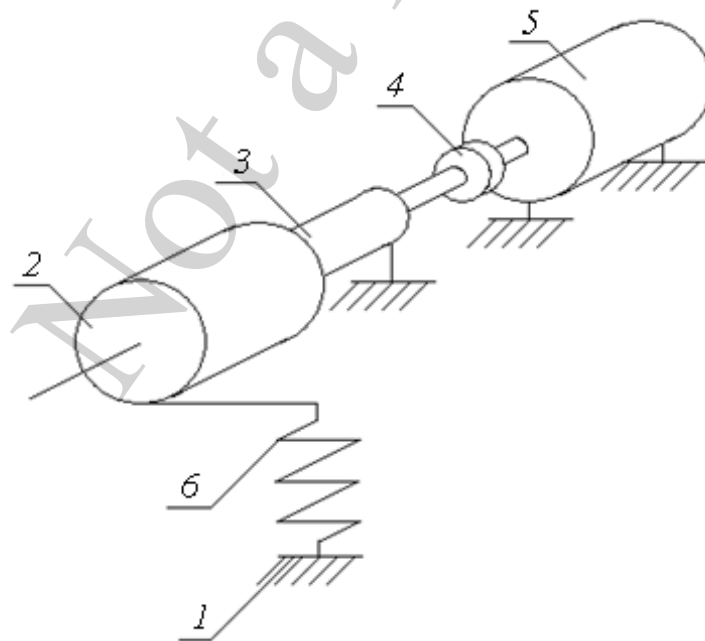


Рис. 4. Загальний вигляд електромеханічної частини стенда випробувального СВ-1:1 – фундамент; 2 – статор; 3 – нерухома перехідна опора; 4 – пружна муфта; 5 – машина для випробувань; 6 – пружний елемент електронних ваг

При виникненні моменту на валу двигуна пружний елемент електронних ваг 6, закріплений одним кінцем на основі 1, а іншим на статорі, створює момент опору й намагається повернути статор в початкове положення. Ротор приводиться в обертання через пружну муфту 4 машиною для випробувань 5. При поданні постійної напруги на обмотки статора в них створюється електромагнітний момент, який намагається повернути статор у сторону, протилежну до обертання ротора до тих пір, поки зусилля пружного елемента 6, прикладене до корпусу статора, не урівноважить електромагнітний момент. На муфті з боку машини навантаження встановлено датчик частоти обертання.

#### **4. 2. Розробка датчика виміру частоти обертання для стенду випробувального СВ-1**

Датчик виміру частоти обертання призначений для використання в стенді випробувальному СВ-1 як джерело сигналу зворотного зв'язку у складі керуючих і вимірювальних систем.

Основні технічні характеристики:

Максимальна частота обертання – 2000 об/хв.

Мінімальна частота обертання – 100 об/хв.

Напруга живлення – 5 В.

Частота дискретизації – 100 Гц.

Розрядність – 10 біт.

Діапазон аналогового вихідного сигналу – 0...5 В.

Тип цифрового вихідного сигналу – паралельний.

Інформація про частоту обертання може бути отримана різними методами, наприклад, за допомогою тахогенераторів, індукційних датчиків, дискретних датчиків. Застосування дискретних датчиків дозволяє легко перетворити інформацію в цифровий код, усунути похибки лінійності та чутливості, характерні для аналогових датчиків. При використанні дискретних датчиків можливі два метода перетворення: підрахунок імпульсів упродовж заданого тимчасового інтервалу або вимір часового інтервалу між суміжними імпульсами та обчислення зворотної функції. Перший спосіб простіший у реалізації, але вимагає тривалого часу виміру. У разі, коли необхідно отримувати результати вимірів через короткі інтервали часу, слід використати другий спосіб, хоча це вимагає більш високої швидкодії вимірювальної схеми.

Як датчика обрано інкрементний енкодер, що містить диск з 60-ма отворами й спеціальну здвоєну оптичну пару з відкритим оптичним каналом НОА 0901. На частоті обертання 2000 об/хв буде отримана частота зміни отворів датчика 2 кГц. Для забезпечення роздільної здатності 10 біт потрібна частота розрахункових імпульсів не менше 2,048 МГц. На мікроконтролерах з традиційною тактовою частотою 20 МГц у разі програмної реалізації частота розрахункових імпульсів 2,048 МГц недосяжна, тому обраний мікроконтролер з апаратним інтерфейсом квадратурного енкодера PIC18F2431. Указаний інтерфейс дозволяє проводити виміри періоду слідування вхідних імпульсів апаратно, контролювати напрям обертання. Вибираємо частоту слідування розрахункових імпульсів 5 МГц.



Обрано режим модуля зворотного зв'язку – інтерфейс квадратурного енкадера, режим виміру швидкості – включено, режим оновлення – чотирикратний, індексний сигнал – не використовується, коефіцієнт ділення схеми виміру швидкості – 4. При такому налагодженні маємо одну подію виміру швидкості на один період енкадера. Для підвищення перешкодозахищеності включено внутрішній фільтр, принцип дії якого полягає в наступному: зміна сигналу буде оброблена, якщо рівень сигналу стабільний упродовж деякого часу (в даному випадку – 32 цикли). Послідовність команд ініціалізації інтерфейсу буде наступною:

```
movlw      b'00011001';1:4, 4 оновлення
movwf      QEICON
bsf        CAP1CON, CAP1REN
movlw      b'00111100'
movwf      DFLTCON
```

З урахуванням того, що частота рахункових імпульсів складає 5 МГц, частота обертання механізму в (об/хв) буде дорівнювати  $5000000/N_x$ , де  $N_x$  – результат виміру. Якщо число  $N_x$  представити у вигляді двобайтового цілого, то мінімальна вимірювана частота обертання складатиме 76 об/хв, що відповідає завданню з невеликим запасом.

Схему електричну принципову датчика виміру частоти обертання показано на рис. 5.

Окрім мікроконтролера пристрій містить цифроаналоговий перетворювач МСР4921 для виводу сигналу в аналоговому вигляді та розширювач портів МС74НС595А для виведення сигналів у цифровому вигляді. Всі елементи пристрою об'єднані синхронним послідовним інтерфейсом SPI.

Схему алгоритму роботи датчика виміру частоти обертання показано на рис. 6. На початку кожного циклу алгоритму у блоці 1 перевіряється, чи завершився інтервал часу, що відповідає частоті дискретизації. Якщо інтервал завершився, то переходимо у блок 2, в якому перевіряється, чи сталися за цей часовий інтервал події виміру швидкості. Якщо подій не було, то вважаємо, що частота обертання нижче мінімальної вимірюваної й може вважатися нульовою.

У блоці 3 відбувається обнулення швидкості. Далі здійснюється виведення отриманої величини. У блоці 4 виводиться аналоговий сигнал через ЦАП, у блоці 6 виводиться цифровий сигнал через розширювач портів. Якщо при перевірці у блоці 2 з'ясувалося, що події виміру швидкості були, то переходимо до блоку 6, в якому обчислюється середнє значення тривалості періоду  $N_x$ , оскільки при високих частотах обертання подій виміру швидкості за період дискретизації може статися більше одного. Далі у блоці 7 проводиться обчислення частоти обертання в обертах за хвилину.

Якщо у блоці 1 з'ясувалося, що інтервал часу не завершився, то приступаємо до блоку 8 – перевірки події виміру швидкості. Якщо подія сталася, то у блоці 9 перевіряємо переповнювання таймера 5, яке показує, що частота обертання занадто низька й виходить за вимірюваний діапазон. Якщо переповнювання не було, то у блоці 10 накопичуємо вимірювану величину, а у блоці 11 збільшуємо лічильник вимірів. Результати роботи блоків 10 і 11 використовуються у блоці 6 для обчислення середнього значення. У блоці 12 відбувається обну-

лення таймера. Алгоритм працює циклічно, таким чином, пристрій функціонує весь час, поки подано живлення.

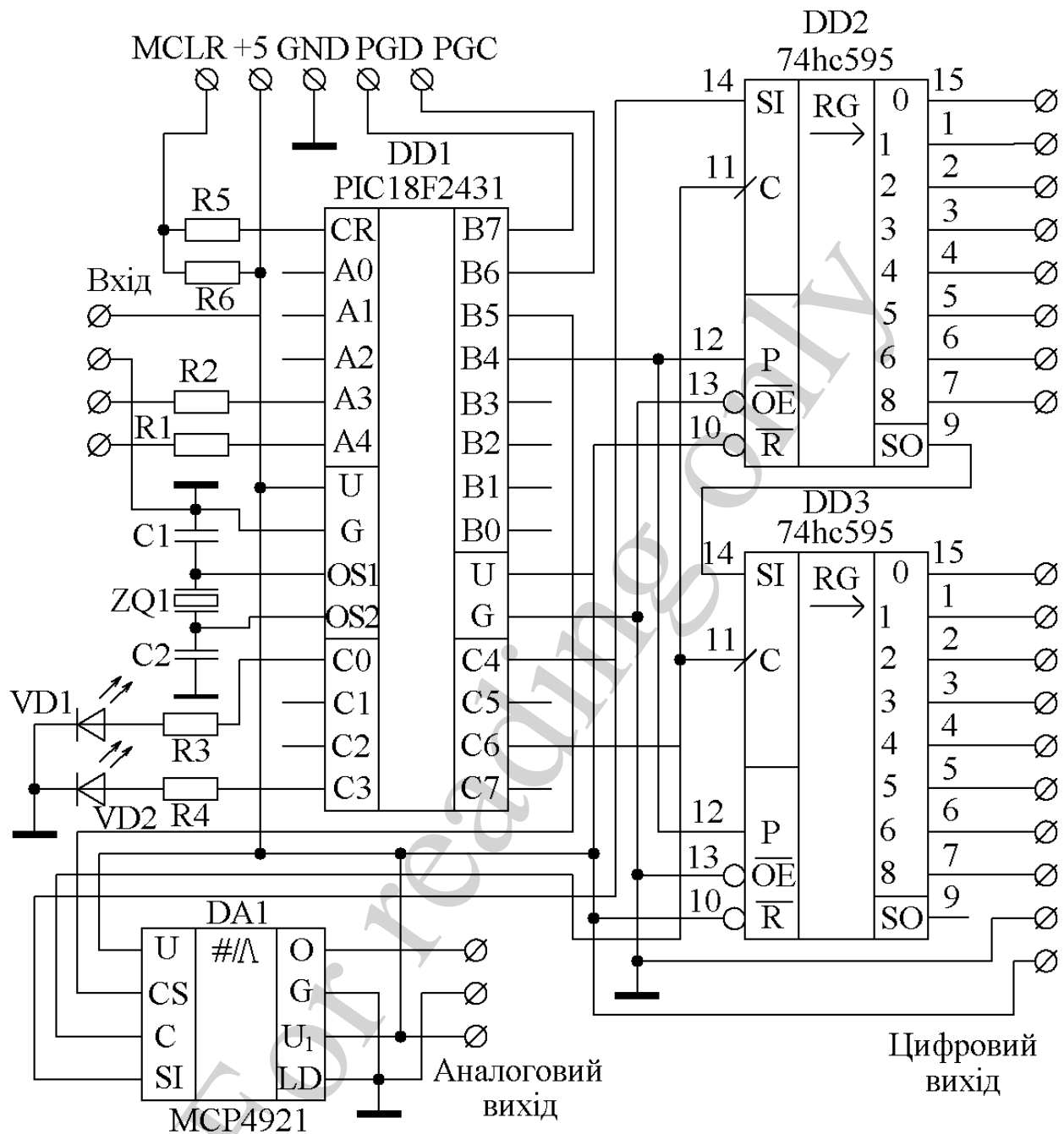


Рис. 5. Схема електрична принципова датчика виміру частоти обертання

Для підтвердження достовірності результатів проведених досліджень було проведено метрологічну атестацію розробленого навчально-дослідницького лабораторного засобу «Стенд випробувальний СВ-1», призначеного для дослідження ефективності СК електроприводами різного роду струму рушійно-кермових комплексів підводних апаратів.

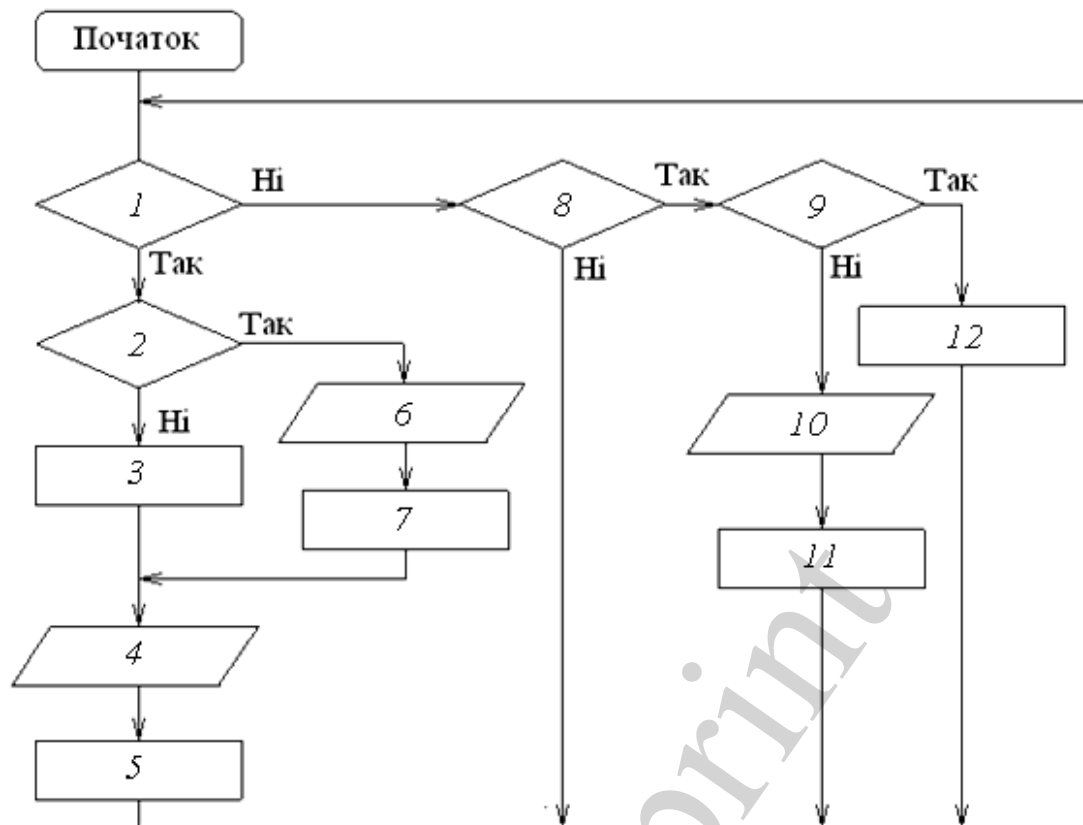
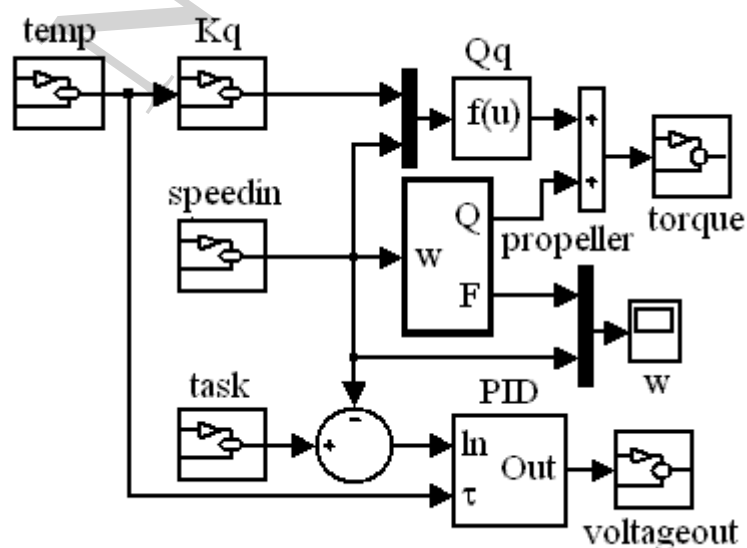
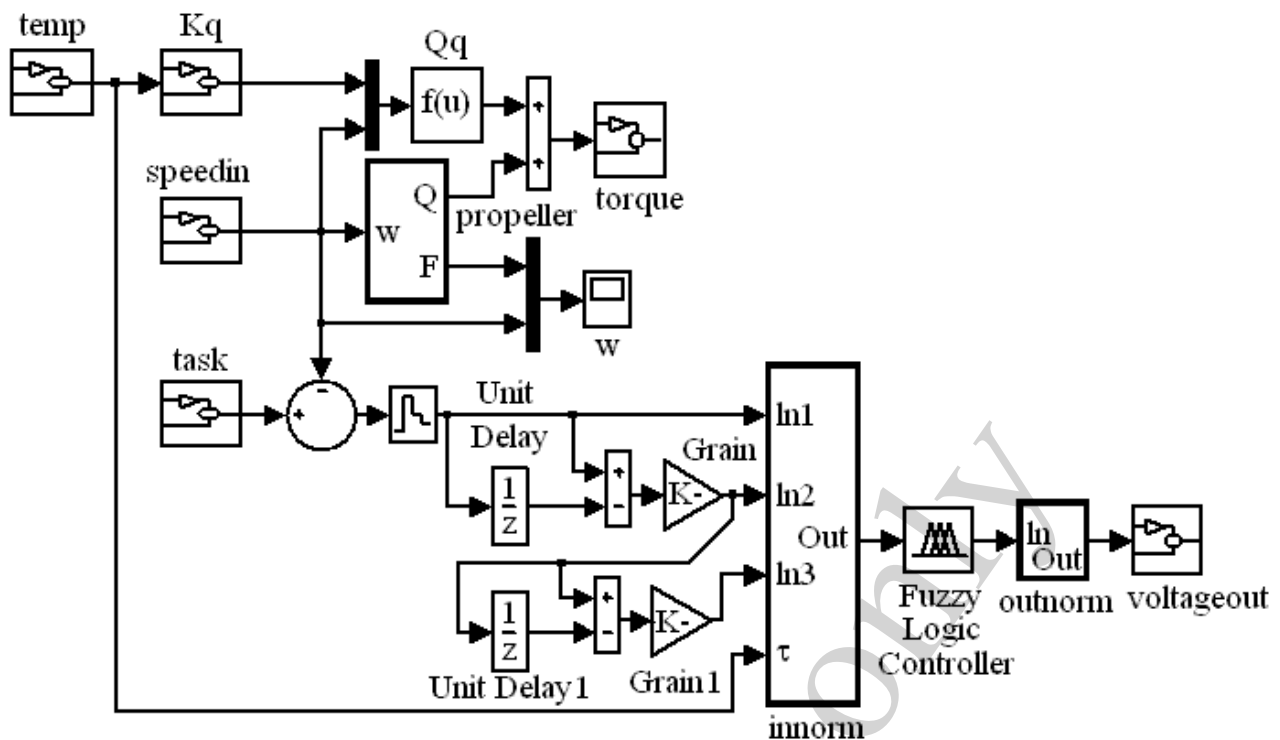


Рис. 6. Схема алгоритму роботи датчика виміру частоти обертання

#### 4. 3. Експериментальні дослідження на СМК систем керування РП з БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з різними регуляторами

Для експериментальних досліджень на СМК СК РП при горизонтальному прямолінійному русі ПА розроблено Simulink-моделі СК РП по стабілізації кутової швидкості, упору гребного гвинта (ГГ) та швидкості переміщення ПА при його горизонтальному прямолінійному русі з синтезованими в [24] адаптивними ПІД-регуляторами та нечіткими регуляторами (рис. 7).





б

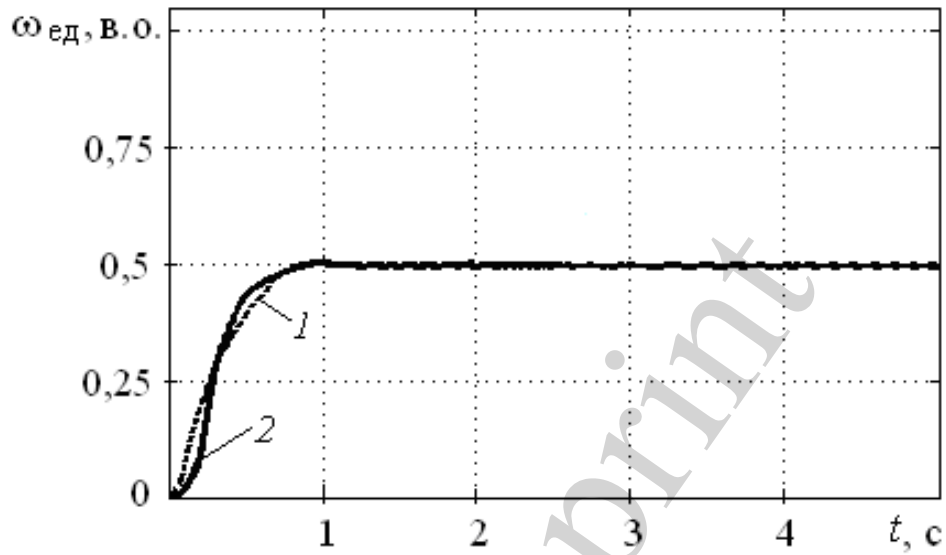
Рис. 7. Simulink – модель для експериментальних досліджень САК РП з БАД по стабілізації кутової швидкості гребного гвинта ПА на СМК: а – з адаптивним ПІД-регулятором; б – з нечітким регулятором

Simulink – моделі (рис. 7) складаються з наступних блоків:

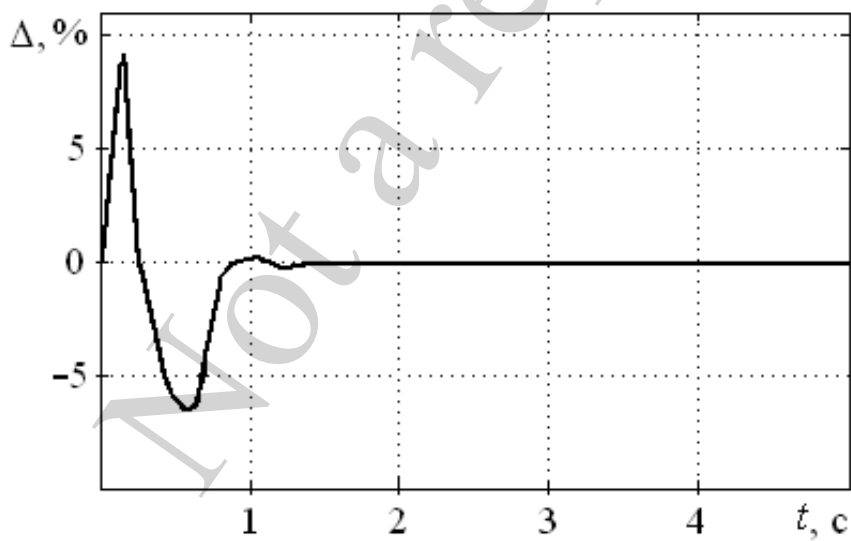
- блок «voltageout» служить для перетворення та передачі керуючої дії на привід виконавчої машини;
- блок «torque» призначений для перетворення та передачі керуючої дії на привід машини навантаження;
- блок «speedin» служить для отримання та перетворення сигналів з датчика частоти обертання виконавчої машини;
- блок «temp» призначений для отримання та перетворення сигналу з датчика температури рідини робочої машини;
- блок «w» використовується для візуалізації результатів експерименту;
- блок «PID» є адаптивним ПІД-регулятором;
- блок «propeller» служить для розрахунку упору гальмівного моменту гребного гвинта;
- блок «task» Simulink-моделі виконує функцію задавального сигналу для системи (кутова швидкість гребного гвинта ПА);
- блок «innorm», в якому робиться фазифікація помилки, першої і другої похідних помилки, температури робочої рідини;
- блок «Fuzzy Logic Controller», в якому проводиться розрахунок керуючої дії;
- блок «outnorm», в якому робиться дефазифікація керуючої дії.

### 5. Результати досліджень на СМК систем керування РП з БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з різними регуляторами

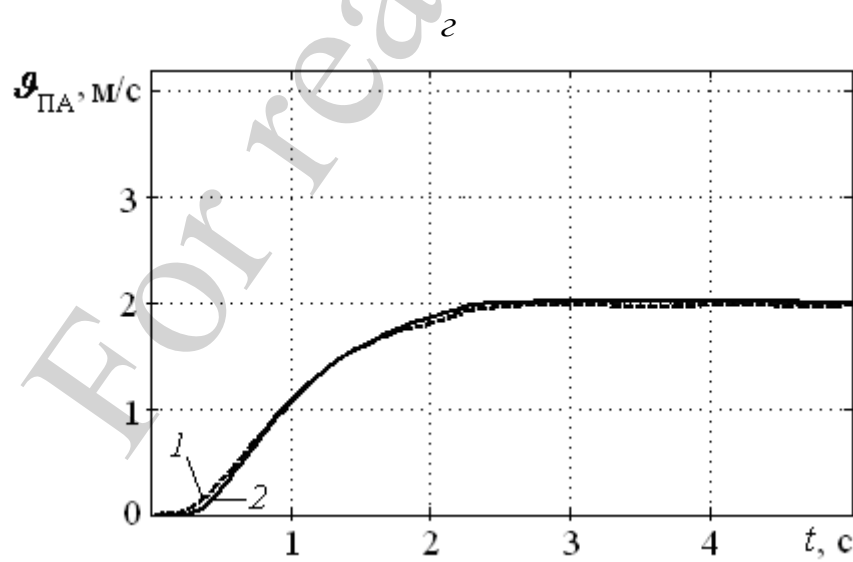
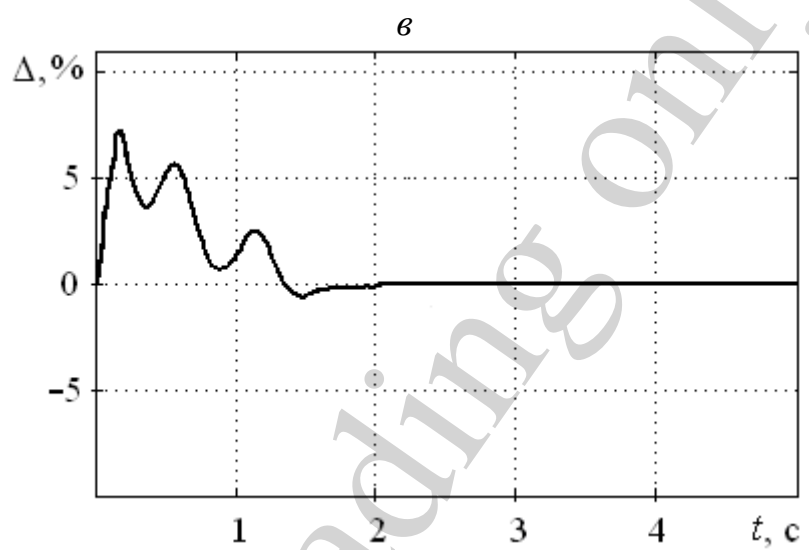
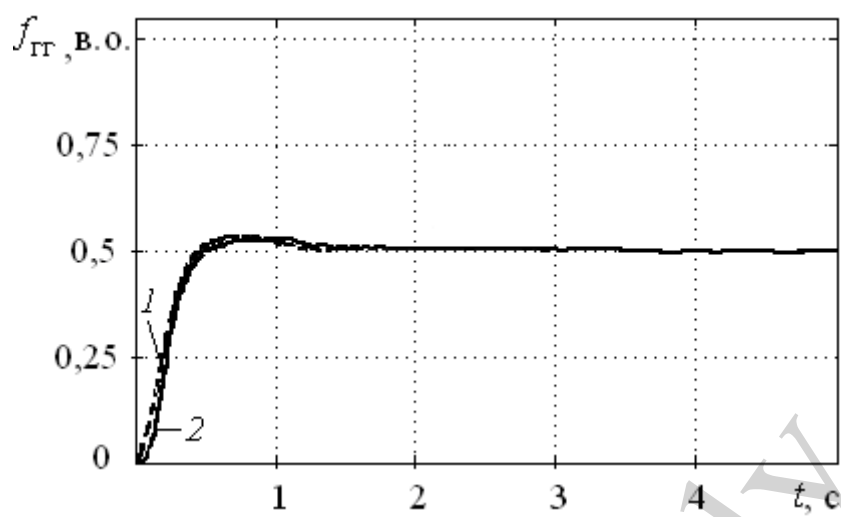
На рис. 8 представлено графіки роботи СК РП з БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з різними типами регуляторів, отриманих при комп'ютерному моделюванні, та експериментальних досліджень за допомогою СМК.



a



б



$\partial$

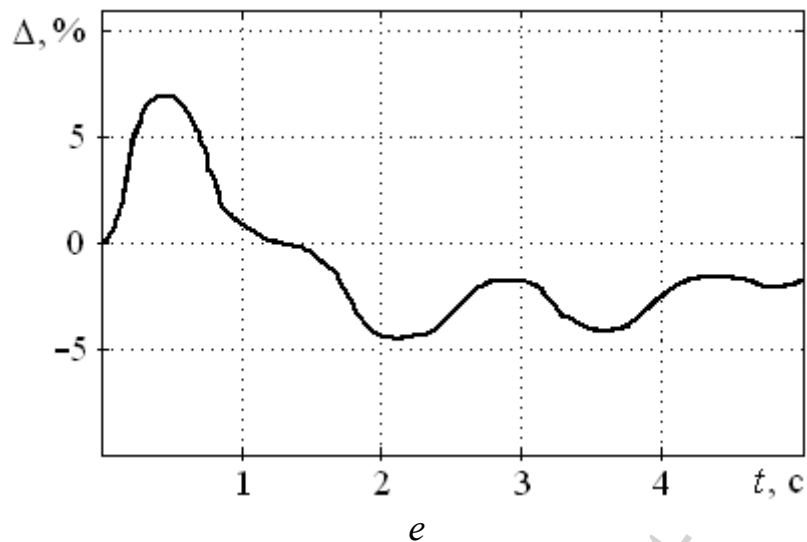


Рис. 8. Графіки роботи СК РП з БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з різними типами регуляторів: а, в, д – результати порівняння експериментальних досліджень роботи СК РП з БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з різними типами регуляторів; б, г, д – розбіжність результатів комп’ютерного моделювання та результатів експериментальних досліджень

На рис. 8 позначено:

– крива 1 – результати комп’ютерного моделювання роботи СК РП з БАД при стабілізації кутової швидкості ГГ  $\square_{ед}$  (з адаптивним ПД-регулятором), упору ГГ  $f_{гг}$  (з нечітким регулятором) та швидкості переміщення при горизонтальному русі ПА  $\vartheta_{ПА}$  (з нечітким регулятором);

– крива 2 – експериментальні дослідження на СМК роботи СК РП з БАД при стабілізації кутової швидкості ГГ  $\square_{ед}$  (з адаптивним ПД-регулятором), упору ГГ  $f_{гг}$  (з нечітким регулятором) та швидкості переміщення при горизонтальному русі ПА  $\vartheta_{ПА}$  (з нечітким регулятором).

Як видно з графіків рис. 8, розбіжність результатів комп’ютерного моделювання та результатів експериментальних досліджень роботи СК РП з БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА не перевищує 8 %.

## 6. Обговорення результатів розробки СМК і дослідження на ньому СК РП з БАД при горизонтальному прямолінійному русі П з різними регуляторами

Розроблений спеціалізований моделюючий комплекс структурно містить:

– електромеханічну частину у вигляді набору електродвигунів постійного та змінного струму з програмно керованим електромеханічним навантаженням на їхні робочі вали;

– програмну частину у складі розроблених у середовищі Matlab Simulink – моделей СК РП з БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА, бібліотеки даних з регуляторами різних типів;

– інтерфейс електромеханічної та програмної частин.

Для підтвердження достовірності результатів досліджень, що проводилися було проведено метрологічну атестацію розробленого навчально-дослідницького лабораторного засобу «Стенд випробувальний СВ-1».

Наведено основні характеристики та можливості навчально-дослідницького лабораторного засобу «Стенд випробувальний СВ-1», а саме

1. Використання роз'ємної пружної муфти дозволяє за короткий час замінити одну машину для випробувань на іншу.

2. Діапазон потужностей електричних машин для випробувань складає від 0,25 до 1,0 кВт, швидкість обертання – до 2000 об/хв.

3. Блокове компонування дозволяє при використанні різного силового обладнання (живлення змінним або постійним струмом) створювати натурні моделі існуючого та проектного електропривода, відпрацьовувати вузли систем керування та САК електроприводом у цілому.

4. Наявність ПЕОМ дозволяє з мінімальними витратами часу синтезувати широкий спектр алгоритмів керування електроприводами та перевіряти ефективність їх функціонування на реальному електромеханічному обладнанні.

5. В ході роботи визначається частота обертання машини для випробувань і обробляється на ПЕОМ. Діапазон виміру частоти обертання від 100 до 2000 об/хв з відносною похибкою не більше  $\pm 2\%$ .

Проведені наступні експерименти: комп'ютерне моделювання за допомогою додатка візуального програмування Simulink, виробничі напівнатурні випробування за допомогою спеціалізованого моделюючого комплексу та виробничі натурні – басейнові випробування. Випробування показали схожимість результатів у межах 8-15 %, що обумовлено врахуванням внутрішніх та зовнішніх складових процесів при моделюванні роботи рушійного пристрою.

## **7. Висновки**

1. Розроблено програмну частину спеціалізованого моделюючого комплексу, що являє собою пакет прикладних програм комп'ютерного і натурального моделювання для відпрацювання в лабораторних умовах алгоритмів і принципів керування, виміру енергетичних і динамічних характеристик електроприводів. Розроблено конструкцію навчально-дослідницького засобу «Стенд випробувальний СВ-1», який є електромеханічною частиною спеціалізованого моделюючого комплексу.

2. Проведено метрологічну атестацію навчально-дослідницького лабораторного засобу «Стенд випробувальний СВ-1», що дає можливість забезпечити точність досліджень, що проводяться згідно паспорту на стенд.

3. Показано можливість синтезу СК РП з БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА з різними типами регуляторів і подальшою їх корекцією за допомогою спеціалізованого моделюючого комплексу. Експериментально доведено працездатність синтезованих СК РП з БАД при горизонтальному прямолінійному русі ПА.

Розбіжність результатів комп'ютерного моделювання та результатів експериментальних досліджень незначна й складає 5–8 %. Виявлено, що наявна затримка на 0,1...0,15 с вихідного сигналу, яка пов'язана з особливостями обробки



вхідних величин (сигналу тахометра), не впливає на зовнішній вигляд характеристик вихідних величин.

Отримані результати використано в навчальному процесі під час підготовки бакалаврів і магістрів у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна), при проектуванні систем керування підводними рухомими об'єктами в рамках вирішення актуальних науково-дослідних, військових завдань, а також аварійно-рятувальних робіт з екологічної безпеки та охорони навколишнього середовища на воді для ряду організації, зокрема Міністерства оборони України, Державної служби України з надзвичайних ситуацій, НАН України.

### Література

1. Лукомский, Ю. А. Навигация и управление движением судов [Текст]: учебник / Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А. Скороходов. – СПб.: Элмор, 2002. – 360 с.
2. Изранцев, А. В. Навигация и управление в подводном пространстве [Текст] / А. В. Изранцев, Л. В. Киселев, Ю. В. Матвиенко, Ю. В. Ваулин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – Вып. 11. – С. 68–74.
3. Filaretov, V. Synthesis of Automatic System for Correction of Program Signal of the Underwater vehicle's Movement on Spatial Trajectory [Text] / V. Filaretov, D. Yukhimets // Control Automation and Systems ICCAS 2010. – Korea, 2010. – P. 126–131.
4. Landau, I. Adaptive Control [Text] / I. Landau, R. Lozano, M. M'Saad, A. Karimi // Communications and Control Engineering. – Springer-Verlag London, 2011. – 587 p. doi: 10.1007/978-0-85729-664-1
5. Yuh, J. Applications of marine robotic vehicles [Text] / J. Yuh, G. Marani, D. R. Blidberg // Intelligent Service Robotics. – 2011. – Vol. 4, Issue 4. – P. 221–231. doi: 10.1007/s11370-011-0096-5
6. Романовский, Г. Ф. Современное состояние и перспективы развития подводных аппаратов в Украине [Текст] / Г. Ф. Романовский, В. С. Блинцов, И. А. Родин // Proceedings of the 5-th International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems. – Szczecin, 2004. – P. 107–117.
7. Сагалевич, А. М. Подводные аппараты в научных исследованиях и подводно-технических работах [Текст]: мат. XII Межд. науч.-техн. конф. / А. М. Сагалевич // Современные методы и средства океанологических исследований. – Москва, 2011. – С. 115–117.
8. Блинцов, В. С. Современные проблемы создания электрооборудования и автоматики подводных аппаратов [Текст] / В. С. Блинцов // Радіоелектронні комп'ютерні системи. – 2007. – № 5 (24). – С. 90–98.
9. Кавалло, Э. Особенности конструкции и системы управления автономного подводного аппарата с одним движителем для его точного перемещения в пространстве [Текст] / Э. Кавалло, Р. Миккеллини, Д. А. Юхимец, В. Ф. Филаретов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – № 6. – С. 98–107.

10. Филаретов, В. Ф. Экспериментальное исследование системы адаптивного формирования программных сигналов движения подводных аппаратов [Текст] / В. Ф. Филаретов, Д. А. Юхимец, Э. Ш. Мурсалимов, J.-H. Guo, H. Shengwei // Материалы 6-ой Всероссийской мультikonференции МКПУ. – 2013. – С. 215–219.
11. Santhakumar, M. Modeling, simulation and model reference adaptive control of autonomous underwater vehicle-manipulator systems [Text] / M. Santhakumar, J. Kim // Proc. of 11th International Conference on Control, Automation and Systems. – South Korea, 2011. – P. 643–648.
12. Юхимец, Д. А. Разработка методов синтеза адаптивных систем управления пространственным движением подводных аппаратов [Текст] / А. В. Лебедев, В. Ф. Филаретов, Д. А. Юхимец // Сб. научных статей ИАПУ ДВО РАН. – Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2011. – С. 82–95.
13. Лебедев, А. В. Анализ системы второго порядка с переменной структурой и неидеальностью переключающего устройства [Текст] / А. В. Лебедев, В. Ф. Филаретов // Автометрия. – 2009. – Т. 42, № 2. – С. 21–28.
14. Король, Ю. М. Влияние гидродинамических потерь на механические характеристики капсулированных управляемых асинхронных двигателей подводных аппаратов [Текст] / Ю. М. Король // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – Миколаїв: НУК, 2004. – № 6. – С. 15–24.
15. Киселев, Л. В. Создание интеллектуальных АНПА и проблемы интеграции научных исследований [Текст] / Л. В. Киселев, А. В. Инзарцев, Ю. В. Матвиенко // Подводные исследования и робототехника. – 2006. – № 1. – С. 6–17.
16. Бобков, В. А. Программный комплекс моделирования пространственного движения автономного подводного аппарата [Текст] / В. Ф. Филаретов, В. А. Бобков, Д. А. Юхимец, С. В. Мельман, Ю. С. Борисов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 1. – С. 8–13.
17. Webots [Electronic resource]. – Cyberrobotics. – Available at: <http://www.cyberbotics.com/>
18. RobSim [Электронный ресурс]. – ДинСофт. – Режим доступа: <http://www.robsim.dynsoft.ru>
19. Robotic Studio [Electronic resource]. – Microsoft Corporation. – Available at: <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=29081>
20. Шандров, Б. В. Технические средства автоматизации [Текст]: учебник / Б. В. Шандров, А. Д. Чудаков. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
21. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов [Текст]: учебник / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 304 с.
22. Филаретов, В. Ф. Устройства и системы управления подводных роботов [Текст] / В. Ф. Филаретов, А. В. Лебедев, Д. А. Юхимец. – М.: Наука, 2005. – 270 с.

23. Агеев, М. Д. Автономные подводные роботы. Системы и технологии [Текст] / М. Д. Агеев. – М.: Наука, 2005. – 398 с.

24. Блінцов, В. С. Удосконалення автоматичного керування рушійно-кермовим комплексом підводного апарата [Текст] / В. С. Блінцов, С. М. Волянський // Вестник НТУ "ХПИ". Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – 2015. – № 12. – С. 238–243.

Not a reprint